

汎用スターリングエンジンの研究開発

山下 巖（元機械技術研究所）

野間口有（産総研最高顧問，三菱電機特別顧問）

【 要 旨 】

ムーンライト計画・大型省エネルギー技術開発の一環として，1982年度から1987年度まで行われた「汎用スターリングエンジンの研究開発」について，開発の目標，研究開発体制などの研究開発計画と評価試験結果をまとめた。さらにプロジェクトに参加した産業界の一員として国主導で進められた研究開発の意義等について述べた。なお，Ⅰは山下巖が，Ⅱは野間口有が執筆した。

Ⅰ ムーンライト計画におけるスターリングエンジンの研究開発

1. まえがき

スターリングエンジンは，1973年の第1次オイルショック後，日本でも省エネルギー性，多種燃料性，低公害性（排ガス，騒音，振動）に優れた新型エンジンとして注目され，また，日本のメーカ等に対し，当時この分野の研究開発をリードしていたオランダのフィリップス社等からもいろいろな接触が試みられていたようである。そのため，船用エンジンおよび自動車用エンジンとしての開発計画の検討がそれぞれ運輸省，通産省を中心に行われ，前者では，1976～1980年度の5年間にわたり，800馬力スターリングエンジンの開発を目指した研究開発が実施された。

これに対し，自動車用エンジンとしての開発は見送られたが，その一因に，当時社会問題になっていたガソリン車に対する排ガス規制が3元触媒の導入等によりクリアできる見通しのついたことがあったと思われる。しかし，通産省サイドでスターリングエンジンに対する関心が失われたわけではなく，アイシン精機が1976～1979年度にわたり通産省の重要技術開発補助金（1976～1977年度は東京ガスが主体）による助成を受け，回転斜板式の複動型エンジンMT79を開発した。また，1977年度からは，筆者が所属していた工業技術院機械技術研究所でも研究に着手し，ムーンライト計画発足後は，その一環である先導的基盤的省エネルギー技術研究開発の中で1981年まで研究用エンジンの試作，運転を含む基礎的研究を実施した。

これらをベースに，ムーンライト計画・大型省エネルギー技術開発の一環として「汎用スターリングエンジンの研究開発」（1982～1987年度）が開始されたわけであるが，「汎用」の言葉通り，その用途には，自動車ではなく，都市

ガスを主燃料とする冷暖房システムと小型動力（発電機）システムが設定された。自動車用が採用されなかった背景には、上述の排ガス対策における状況変化のほか、米国でフォード社が開発中止を決定し、1978年にスタートしたエネルギー省（DOE）の自動車用スターリングエンジン開発計画に大手自動車メーカーは参加しなかったこともあったと思われる。

冷暖房システムを中心とする用途設定が行われた主たる理由は、冷暖房用を中心とする民生部門でのエネルギー消費の伸びが目立ち始め、この分野での省エネルギー化および石油代替化の推進をはかることが極めて重要であると考えられたことである。すなわち、熱効率に優れた可能性を持つスターリングエンジンは、自動車に比べ格段に運転時間の長い冷暖房システム等へ適用された場合に、その効果を最大限に発揮できる可能性があり、さらに、スターリングエンジンの欠点の一つとされている冷却水放熱量が大きいことも、これを暖房あるいは給湯に利用することにより、逆に総合的なエネルギー利用効率を高めるために活かせる可能性があると考えられた。また、エンジン駆動の冷暖房システムや小型発電システムの導入が、夏場の電力ピークのカットすなわち電力負荷平準化に寄与し、さらに前者は寒冷地でのヒートポンプの普及につながることも期待された。外燃機関であることによる多種燃料性、低公害性も当然期待された。そして、この研究開発をベースにスターリングエンジンの実用化技術を確認し、自動車等の他分野での展開をはかるための基礎を築くことが基本的な狙いとされたことは言うまでもない。

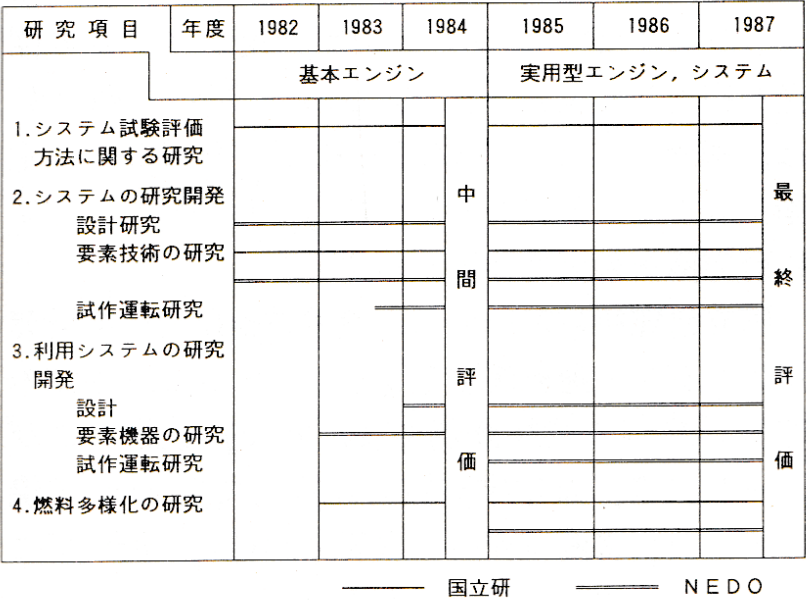


図1 ムーンライト計画における研究開発スケジュール

表1 ムーンライト計画における基本目標

区 分	開発 目標項目	用途	冷 暖 房 用		小型動力用	備 考
		容量	3 kW 級	30kW 級	30kW 級	
エ ン ジ ン	主 燃 料	天 然 ガ ス				30kW 級は、損失に補機動力を含む。
	熱 効 率	約32%	約35%	約37%		
	排 気 ガ ス	ボイラ規制以下				
利用システム	成績係数	冷房時	0.92 (1.43)	1.09 (1.57)	—	() は給湯を含む場合 排熱回収率70%
		暖房時	1.49	1.63		
	耐 久 性	10年				
	メ イ ン テ ナ ンス	1 回／年				
	騒 音	45dB (A) 以下	60dB (A) 以下			
	変 動 率	—			電圧±0.2% (整定時)	
		—			周波数 ±0.5Hz	

2. 研究開発計画

「汎用スターリングエンジンの研究開発」では、上述のように、スターリングエンジンを民生部門等における省エネルギー化および石油代替化の推進への寄与が期待できる新型熱機関として位置付け、その実用化技術を確立することを目的に基本計画が立案された。表1に基本計画における開発目標、図1に研究開発スケジュールを示す。

2.1 エンジン本体

表1で、エンジン出力が3kW級、30kW級と比較的小容量になっているのは、冷暖房等の利用システムとの適合性が考慮されたためである。目標熱効率は、3kW級エンジンで32%、30kW級で35%に設定された。ただし、小型動力用の30kW級エンジンでは、他の作動ガスが、ヘリウムであるのに対し、水素を作動ガスに使用することを想定し37%とやや高い目標熱効率が設定された。

これらは、ディーゼルエンジンと同等あるいはそれを上回る水準にあり、国際的に見ても最高レベルのものであった。なお、エンジンの熱効率は、冷却水入口温度25℃における軸出力（30kW級エンジンでは、ブロワー等の駆動に要する補機電力を差し引く）と低位発熱量の比で定義されている。燃料には天然ガス（都市ガス13A）を使用し、ボイラー規制以下のクリーンな排ガスレベル（例えば、NO_xについては0.5%で150ppm）を達成することも目標とされた。

2.2 利用システム

表 1 のように，利用システムについては，耐久性，騒音レベル等が目標として掲げられ，冷暖房システムでは目標成績係数も定められた。冷暖房システムの性能は，当時実用化が間近な状況にあったガスエンジン・ヒートポンプを凌駕し，将来的にこれに置き換わることを狙って設定されており，特にその騒音レベルは電動式と同等のレベルになっている。ここで，成績係数は，JIS で定められた標準的な冷暖房条件での値であるが，エンジン本体の場合と異なり高位発熱量を基準（ただし，補機消費電力は考慮せず）として定義されている。なお，給湯温度はなるべく高いことが望ましいが，その上昇はエンジン熱効率を低下させるので，許容される下限の 45℃に定められた。

一方，小型動力用である発電機システムの開発は，小型ディーゼルエンジン発電機の代替を狙ったもので，燃料多様化，低公害性が主な利点として考えられおり，コジェネレーションへの展開も想定された。

2.3 研究開発スケジュール

図 1 の研究開発スケジュールに示されているように，中間評価までの 3 年間に基本エンジンを試作し，要素技術を含むエンジンの設計・製作技術に目処をつけた後，実用型エンジンおよび利用システムの開発に進み，最終年度に目標の達成度，将来性等について最終評価を行うことが予定された。計画は当初のスケジュール通り実施され，また，研究開発費用として総額約 100 億円が予定されていたが，最終的には約 80 億円で収まっている。なお，図 1 に見られるように，燃料多様化も研究対象とされており，木質系燃料およびメタノール等の液体燃料の利用技術についても研究が行われた。

2.4 研究開発体制

研究開発は，工業技術院のムーンライト計画推進室のマネジメントの下で，国立研究所が基礎的な支援研究を，新エネルギー総合開発機構（NEDO）がエンジンおよび利用システムの開発を担当して実施された。なお，1986～1988 年には，国際エネルギー機関（IEA）を通して，米国，スウェーデンとの研究協力も行われた。図 2 に研究開発の実施体制を示す。

国立研究所においては，機械技術研究所で研究用エンジンの運転実験とシミュレーション手法の開発に基づく試験評価方法，熱交換技術およびシール技術，航空宇宙技術研究所で低 NO_x 燃焼技術，公害資源研究所で木質系燃料の燃焼技術についてそれぞれ研究が行われた。

NEDO における研究開発は、三菱電機、東芝、アイシン精機、三洋電機の 4 社に委託して進められた。開発エンジンは、3kW 級と 30kW 級の 2 つの容量のエンジンに大別され、それぞれ 2 機種 of 計 4 機種からなっている。エンジンの略称と形式等を表 2 に示す。これらの基本的な開発目標は、もちろん表 1 の通りであるが、計画をより具体化するため、運転条件の明確化、より詳細な開発基準の設定等が行われた。

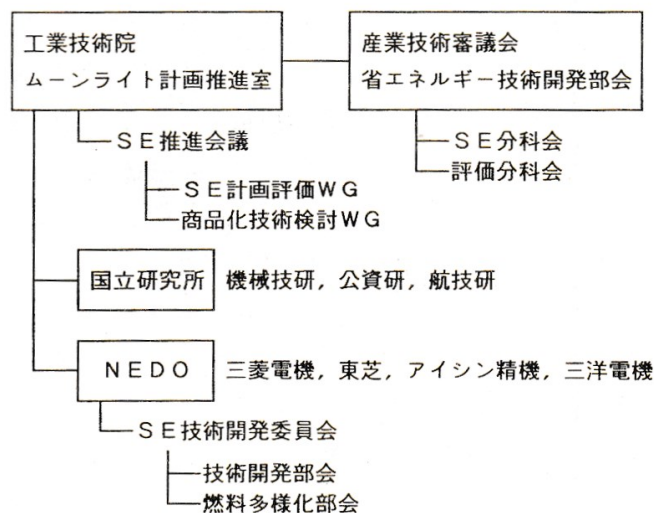


図2 ムーンライト計画における研究開発体制

表2 開発エンジンの主な諸元および運転条件（最終評価時）

用 途	冷暖房システム（ヒートポンプ）			小型発電機	単位
出 力 容 量	3kW 級		30kW 級		—
開発メーカー名	三菱電機	東芝	アイシン精機	三洋電機	—
機 種 名	NS03M	NS03T	NS30A	NS30S	—
エンジン形式	単筒ディスプレイサ型	V 2 式 2 ピストン型	4 気筒回転斜 板式複動型	4 気筒 U 4 式 複動型	—
掃気容積 膨張	161	190	148×4	145×4	cc
圧縮	161(P) ¹⁾	169	138×4	135×4	cc
ピストン位相差	40(P-D 間) ¹⁾	100	90	90	deg
ボア	80	82	60	68	mm
ストローク	32	E:36/C:32	52.4	40	mm
作動ガス種類	He	He	He	He	MPa
作動ガス平均圧	6.2	6.4	14.5	15.4	
冷却水温度	25	25	25	25	
ヒータ管温度	785	817	773	945 ²⁾	
膨張空間ガス温度	701	729	695	682	
NOx 対策	EGR	EGR+触媒	燃焼制御	触媒	—
エンジン重量	60.5	73.6	243	375	kg

注) 1) P:出力ピストン, D:ディスプレイサ 2) センサー設置法が他と異なる

3. 評価試験結果

プロジェクト発足後、約2年半を経過した1984年12月から1985年3月にかけて、4機種の基本型エンジンの評価試験が機械技術研究所において実施され、これを基に中間評価が行われた。その結果、いずれのエンジンにおいても基本目標達成の見通しが得られたと評価され、4機種とも実用型エンジンおよび利用システムの開発に進むことになった。ただし、安定性の向上、NO_x排出レベルの低減、小型軽量化等に一層努める必要があることが課題として指摘された。

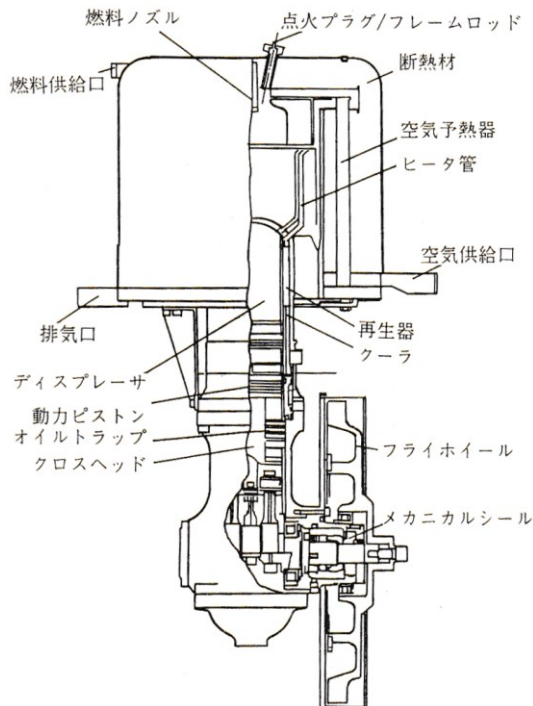


図3 NS03M エンジン (三菱電機)

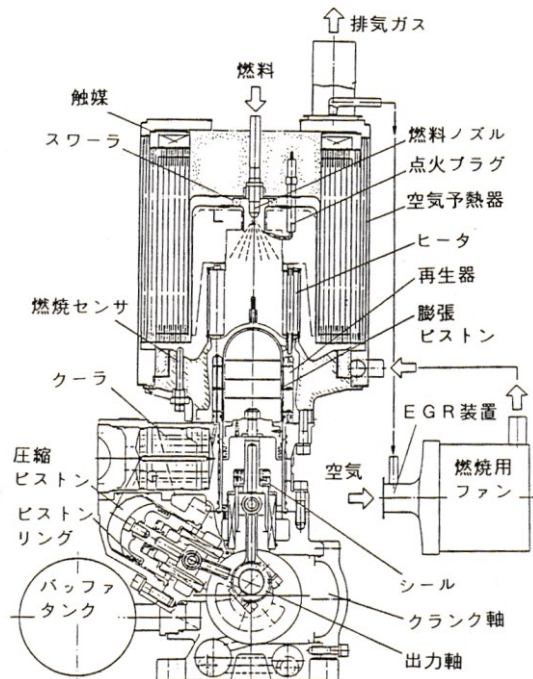


図4 NS03T エンジン (東芝)

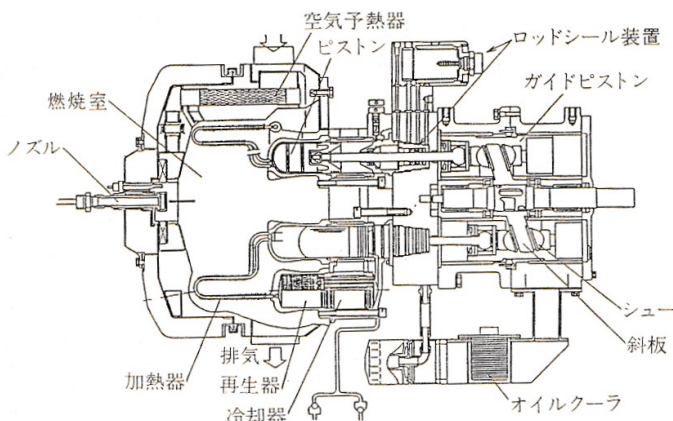


図5 NS30A エンジン (アイシン精機)

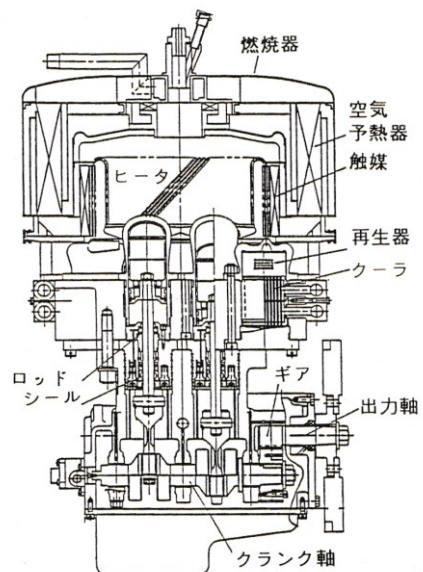


図6 NS30S エンジン (三洋電機)

表3 エンジン本体の代表的特性

項 目	NS03M	NS03T	NS30A	NS30S	単位
最高出力特性					
平均圧	6.2	6.4	(14.7)	(15.5)	MPa
最低圧	(4.7)	(4.9)	11.2	11.4	MPa
回転数	1400	1300	1500	1800	rpm
軸出力	3.81	4.14	30.4	45.6	kW
熱効率	31.0	30.3	33.0	35.2	%
最高熱効率特性					
平均圧	6.2	6.4	(14.5)	(15.4)	MPa
最低圧	(4.8)	(4.9)	11.1	11.3	MPa
回転数	600	850	1000	1120	rpm
軸出力	2.03	3.08	23.2	30.9	kW
熱効率	35.9	32.6	37.5	37.2	%
ボイラー効率	81.1	77.7	92.8	83.5	%
プリヒータ効率	73.4	73.7	80.9	68.5	%
内部変換効率	56.4	53.2	51.6	50.0	%
図示熱効率	49.5	46.5	47.3	47.6	%
機械効率	89.5	90.2	87.0	96.2	%
補機動力	0.05	0.09	(0.44)	(0.84)	kW

3 kW 級 熱効率=軸出力/熱入力 (LHV)

30kW 級 熱効率=(軸出力-プロワ駆動動力)/熱入力 (LHV)

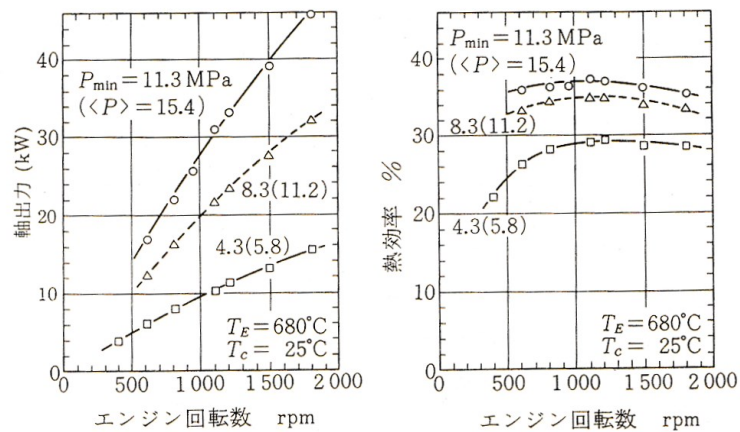


図7 エンジン本体の部分負荷特性 (NS30S)

そして、最終年度の1987年10月から1988年2月の約4ヶ月間にわたり、機械技術研究所において実用型エンジンおよび利用システムの最終評価試験が実施された。この試験に並行して、統一基準に基づくエンジン本体およびシール装置の耐久性試験も各社において行われた。以下では、この最終評価試験の結果をもとに、研究開発成果を紹介することにする。

3.1 試験方法

エンジンの評価試験では、その特性を詳細かつ総合的に把握するために、測定項目は軸トルク、回転数、作動ガス圧力、燃料流量、燃焼用空気流量、冷却水放熱量、ヒータ管温度、膨張空間ガス温度、排気ガス成分濃度、補機消費電力、等々と極めて多岐にわたり、全体の測定点数は約120点に上った。特に、

内部特性を明らかにするために、指圧線図の測定と解析も行われた。また、組立て式無響室を用いて騒音レベルの測定も実施された。

一方、冷暖房システムについては、水冷チラー方式は水側熱量計、空冷パッケージ方式は 2 次冷媒熱量計に接続することによって試験された。しかし、騒音レベルはいずれもパッケージ化されたシステムを対象に測定された。また、発電機システムの試験は、その出力端を容量と力率が可変の負荷装置に接続することによって行われた。

3.2 エンジン本体の試験結果

最終評価試験時点における 4 機種エンジンの断面図を図 3～図 6 に、主な諸元および運転条件を表 2 にそれぞれ示す。また、試験結果の一部を表 3 に、部分負荷特性の一例を図 7 に示した。

中間評価時には、程度の差はあれ各エンジンに共通して気筒内圧力にアンバランスが生じ、運転状態が不安定になる傾向が見られた。しかし、ピストンリング等の改良により、最終評価時にはこのような現象は全く現れず、全てのエンジンにおいて極めて安定した運転が行われ、目標の軸出力は十分に達成された。熱効率も格段に改善され、表 3 に見られるように、いずれのエンジンにおいても目標熱効率が達成された。これは、ヒータおよびクーラの改良による有効温度比の向上、再生器の熱的性能と器壁の熱絶縁性の改良による内部熱損失の低減により、内部変換効率や図示熱効率によって代表される内部性能の向上に成功したことによるものと認められた。また、空気予熱器の性能向上や機械損失の低減の寄与があったことも確認された。

スターリングエンジンの特長の一つとして、常に排気ガスの清浄性が挙げられるが、実際には NOx の低減と熱効率の向上を両立させることは容易でなく、事実、中間評価時にはかなり高い NOx 排出濃度が測定された。これに対して、最終評価試験においては、表 2 のように異なった対策方法が採用されたが、図 8 に例示したように、いずれの場合にも 150ppm 以下の目標が達成された。ただ、燃焼制御のみによる対策が行われた NS30A では、図 8 のように低負荷領域で NOx 濃度の上昇が見られたが、付帯機器を用いない本質的な対策方法として注目された。

寸法、重量も目標とされた水準にほぼ達したが、特に、3kW 級エンジンの重量が中間評価時の 1/4 以下に低減されたのが目立った。NS03M エンジンの寸法と形状の変遷の様子を図 9 に示す。在来エンジンに比べ寸法や重量の点で劣るのは事実であるが、想定している利用システムに組み込んだ場合には、十分に競合できるレベルであり、また、出力容量の適正化や部品の軽量化を進めれば、

さらに小型・軽量化が可能になるものと見込まれた。

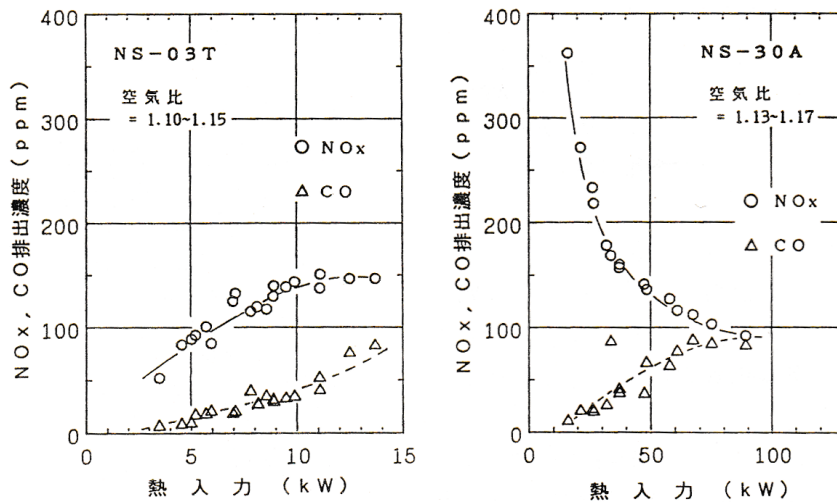


図8 エンジン本体の排ガス特性
(NS03T, NS30A; O_2 5%)

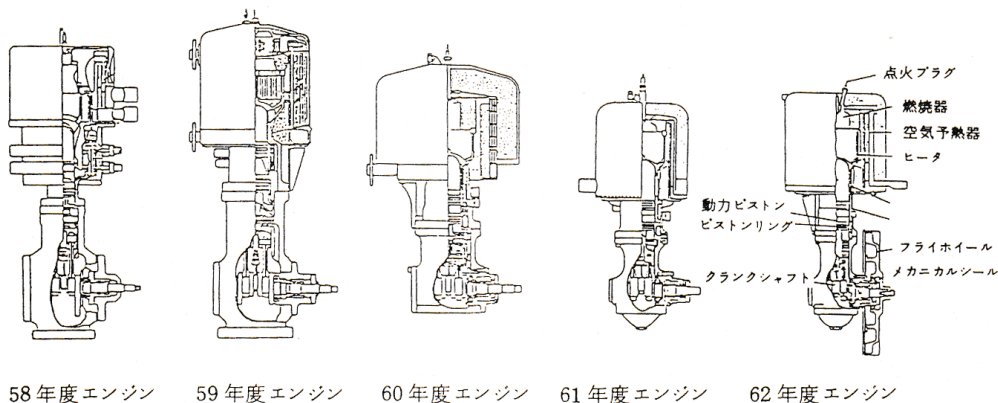


図9 エンジン構成，サイズの変遷 (NS03M)

3.3 利用システムの試験結果

冷暖房システムは，スターリングエンジンによりランキンサイクルの冷凍サイクルを駆動するシステムであり，その構成例を図10に示した。表4に示すように，熱効率に優れたエンジンの開発により，冷暖房システムにおいても高い成績係数COPが実現され，いずれのシステムでも目標を大幅に上回った。冷房時の特性の一例を図11に示す。COPの向上には，圧縮機を中心とした冷媒サイクルの高性能化，高度な廃熱利用を行いうるシステムの開発の寄与も大きかったものと思われる。特に，NS03MおよびNS03Tの圧縮機には，エンジンとの適合性も考慮しつつ，小型圧縮機としては最も先進的なスクロール型が採用された。また，NS30Aでは，エンジンと一体化された圧縮機の採用が機械効率の向上に寄与したと考えられる。

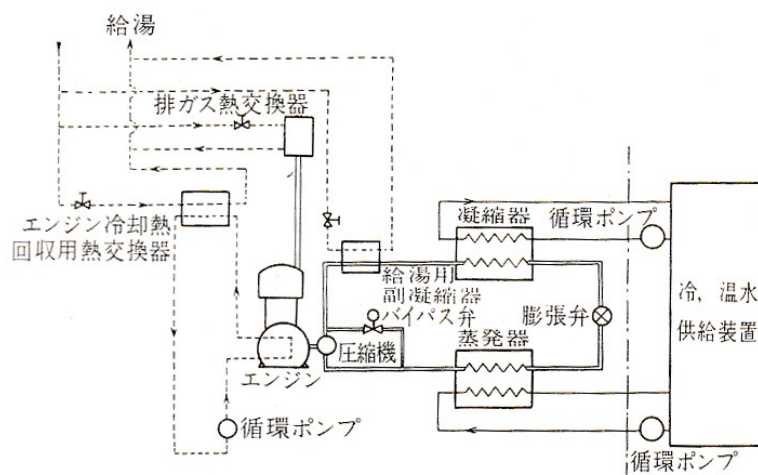


図10 冷暖房システムの構成例 (NS03M)

表 4 に見られるように、冷房時の給湯を含めた COP では、3kW 級の小型システムの方が 30kW 級システムを上回ったが、これは、前者では凝縮器廃熱の一部が給湯に利用されたのに対し、後者ではこれが行われていないことによってい。また、給湯温度は 45℃ (供給温度 20℃) に設定されたが、実用的にはもっと高い温度が要求されることが多いので、給湯を含めた COP はやや過大評価になっている可能性がある。

制御性に関しても、図 12 に例示したように、冷暖房用として十分な特性を持つことが実証された。騒音レベルも表 4 に示したように良好な結果が得られた。その中で、NS30A が極めて良好な騒音特性を示しているのは、このシステムが 4 気筒回転斜板式エンジンを採用していることによるものと思われる。

一方、発電機システムも十分に低い周波数変動率等を示し、発電機駆動用としてのスターリンエンジンの可能性も実証された。しかし、騒音レベルは 70dB を超える結果になった。これはエンジン駆動機構部に使用された歯車に原因があり、U4 式エンジンの問題点と言えよう。発電機システムで特に重要視される制御性に関しては、50%程度の負荷変動に対しては問題のないことが分かった。

表4 冷暖房システムの代表的特性

項 目	NS03M	NS03T	NS30A	単 位
システム構成	水冷チラー	空冷パッケージ	水冷チラー	—
圧縮機形式	スクロール	スクロール	4気筒斜板式	—
冷房性能				
常用特性				
冷房能力	6110	7850	45300	kcal/h
冷房COP	1.25	1.24	1.30	—
冷房給湯COP	2.16	2.05	1.89	—
能力可変範囲	3900～8500	5670～9380	23000～64700	kcal/h
NO _x レベル	113～146	88～142	114～207	ppm
騒音レベル	41.5～52.9	47.5～55.9	49.0～55.6	dB (A)
暖房性能				
常用特性				
暖房能力	10460	10070	76700	kcal/h
暖房COP	1.79	1.73	1.93	—
能力可変範囲	6310～15770	6720～13420	36700～118300	kcal/h

成績係数COP＝冷暖房・給湯能力／熱入力（HHV）

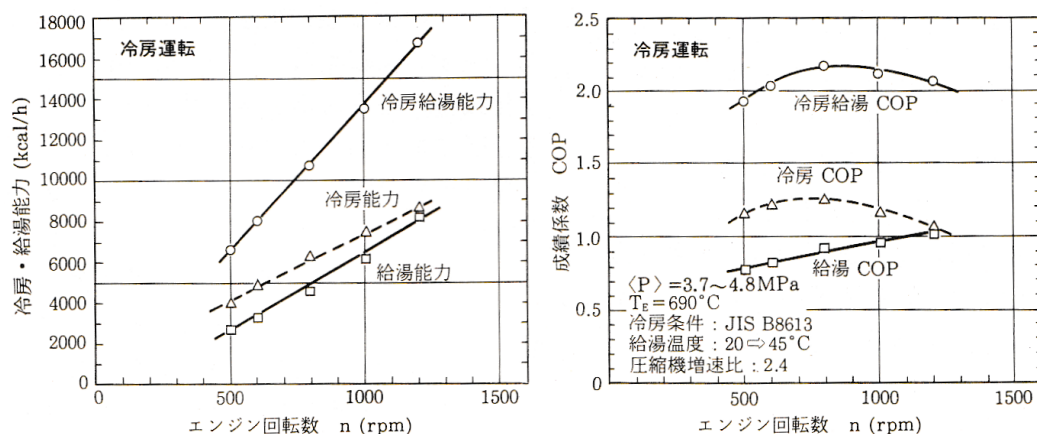


図11 冷暖房システムの冷房特性（NS03M）

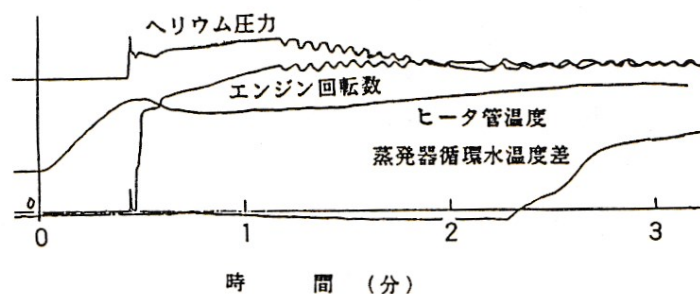


図12 冷暖房システムの起動特性
(NS03M 冷房：0→800rpm)

3.4 研究開発成果

上述のように、ムーンライト計画では、世界最高水準の熱効率を持つスターリングエンジンを開発し、しかも低NO_x化と両立させることに成功した。ただ、小型動力用30kW級エンジンで予定された水素を作動ガスとする運転は水素の取扱上の問題で実施できず、シミュレーションによる性能予測を行うに留まった。また、2万時間の耐久性についても、エンジン本体500時間およびシール装置1万時間の耐久試験の結果から推定するに留まり、その実証は課題として残された。しかしながら、スターリングエンジンが優れた熱効率と環境適合性を有し、特に、冷暖房システムに適用した場合にその特長を最大限に発揮できることを実証したことは画期的な成果であったと言えよう。

なお、紙面の都合で触れられなかったが、開発の基盤には、エンジン特性の計測・解析技術、コンピュータシミュレーションに基づくエンジン設計技術、ヒータ、クーラ、再生器、空気予熱器を含む熱交換器の設計・製作技術、ピストンリング、ロッドシール、油侵入防止等に関するシール技術、低NO_x・低騒音燃焼技術、駆動機構部の損失低減と低騒音化、作動ガス圧力制御を中心とした出力制御技術、等に関する研究開発成果があったことは言うまでもない。

また、上記の評価試験は統一的な運転条件と手法によって実施され、主要データは全て公表されている。このように、複数のメーカーの手で開発されたスターリングエンジンと利用システムが同一条件で、しかも同時に試験された例は世界的にも無く、ムーンライト計画における大きな成果の一つであったと言える。

4. あとがき

以上に述べた研究開発により、スターリングエンジンにより駆動する冷暖房システムすなわちスターリングエンジンヒートポンプシステム（SEHP）が優れた省エネルギー性、環境保全性を持つことが実証されたことを受け、この実用化を推進するため、工業技術院の省エネルギー技術開発助成事業に基づき、1988～1991年度の4年間にわたり実用化研究が実施された。SEHPの耐久性の実証、コスト低減等を主目的にしたこの実用化研究には、三菱電機、アイシン精機、ガス3社等から構成される2グループが参加し、複数台のSEHPの試作と耐久試験が行われた。また、SEHPの実用化を側面から支援するため、ヒートポンプ技術開発センターを中心に、高圧ガスの取り扱い等を含むSEHPの安全化技術を確認するための検討も行われてきた。この結果、1991年末までに67台にのぼる製作実績と1台当たり最長1万時間に達する運転実績をベースに、耐久性の向上、安全化技術の確立、低コスト化の検討が進み、民生分野で世界初のスタ

ーリングエンジンの商品化が間近な段階に達した。

しかしながら、このプロジェクトで開発されたようなシステムは、残念ながら日の目を見ないままに終わっている。その理由にはいくつか考えられるが、主なものとして競合するガスエンジンや燃料電池を利用するシステムに対抗できないとの判断がなされたためだと考えられる。今後、再起する見通しもないが、この研究開発の経験が反省も含めて他分野での研究開発に活かされることを期待したい。

Ⅱ 「汎用スターリングエンジンの研究開発」に参加して

— 国プロの意義を実感 —

7 月中頃、産総研の前身の一つである機械技術研究所 0B の山下巖博士の訃報を受けた。私は上記研究開発の NEDO プロジェクトに於いて山下氏の薫陶を受けた一人として、大きな衝撃を受けた。心から深甚の哀悼の意を表したい。以下の文は、編集委員の筒井康賢氏から、山下氏の著された「AIST 研究秘話」に合わせてプロジェクトに参加した者として何か経験談を書くようにとの要請を受けて作成したものである。訃報を受けた時丁度拙稿が出来たところだったので、書き改めるべきか悩んだが、ご存命を前提にして作成したものの方が、思いが自然に出て良からうと思ってそのまま提出することにした。

ムーンライト計画に於ける汎用スターリングエンジンの研究開発について書くようにと編集者から依頼を受けた。しかし同研究開発については山下巖氏の論述で余すところなく触れられているので、「AIST 研究秘話」に付け加える事は何もない。そこでここでは、編集者からの折角のお話なので、プロジェクトに参加した産業界の一員としての立場から、国主導で進められた研究開発の意義等について、私見を述べてみたい。

この研究開発プロジェクトは、ムーンライト計画・大型省エネルギー技術開発の一環として 1982 年度にスタートした。省エネルギーはわが国にとって極めて重要な課題であり、その上当時逼迫気味であった電力以外のエネルギー源で冷暖房・給湯が賄える可能性があることも本プロジェクト推進の理由であった。

当時筆者は三菱電機の研究所のグループマネージャであったが、家庭用や業務用の暖房機の開発や自動車用エンジン制御システムの研究チームを率いていた。グループでは、社内の製造拠点のための新製品開発・新技術開発だけでなく、資源の節約や資源の多様化につながる未踏技術にもチャレンジしようと若手を中心に取り組んでいた。その一環としてスターリングエンジンも取り上げた。内燃機関と違って外燃（熱）機関であるので、太陽熱、バイオマス等がエネル

ギー源として使える可能性があることも魅力であった。文献等でその理論効率の高さは注目に値するという事は知っていたが、何度か試作して見た結果、高温部と低温部の温度比や容積、再生機の効率等々の機関構成の諸元・条件が効率に大きく影響するという事で、サイクル解析技術などの充実を図っていた。このような経験を重ねていたところで、ムーンライト計画で取り上げられることを知り参加を申請した。

80年代はわが国が高度成長期を経て産業競争力が欧米先進国に肉薄し、部分的にはそれを凌駕したと言われた時代である。しかし競争力を支えた技術の多くは欧米先進国から導入したものであった。それ故技術ただ乗りという批判を彼らからしつこく受けていた。したがって、導入技術をうまく使いこなすだけでなく、世界を先導する技術・製品をいち早く実証し発信したいという思いが国にも民間にも高まっていた。エネルギー関連技術の研究開発においても、導入の時代から競争・協調の時代へと意識変革が起こっていたのである。サンシャイン計画やムーンライト計画がスタートしたのはまさにこのような時代の要請によるものである理解していた。

ムーンライト計画には、それぞれタイプは違うが当社、東芝、アイシン精機、三洋電機の4社が参加し、機械技術研究所等の国研の支援も受けて研究開発を推進した。出力や熱効率などの初期に定めた目標は一応クリアしたが、事業として成功するまでには残念ながら至らなかった。その理由は既に山下氏に指摘されている通りであるが、民間の立場で付け加えるとすれば、主たる応用分野である空調や給湯において既存製品に匹敵する生産性やコストパフォーマンスを実現する展望が開けなかった事である。

しかし、参加した者にとっては大きな教訓があった。NEDO主導のもと4社共同で調査し、米国DOE等でのエンジン研究の状況、エネルギー源多様化へ向けた世界的な研究開発の状況などの情報に触れ、大いに刺激を受けた。また、企業にとっては全て自社技術で対応することは無理でも、多くの優秀な技術を持つ他企業や国研、大学などと協力する、所謂オープンイノベーションによって多くのブレークスルーが実現することも経験した。特に機械技術研究所は山下氏のリーダーシップのもとエンジン開発の基礎・基盤技術の研究を推進し、成果を公開すると共に、エンジン評価の公正で公平な手法の開発などで大きな役割を果たした。

また、筆者が属していた会社では、スターリングエンジンだけでなく工業技術院やNEDOの他のプロジェクトにも多く参加していたが、いずれも先程述べた時代認識の下で設定されたものと言えた。その後、研究所のトップ、企業のトップを経験したものとして振り返ってみると、まさに科学技術立国を目指す官

民挙げての取組であったのである。あの時代に獲得した技術を敷衍し進化させて、わが国を代表する事業として実現したものは数多くある。筆者が直接担当したわけではないが当社の例を一，二挙げると，ヒートポンプ装置や大型工業技術として取り上げられた高性能レーザ装置がある。いずれも今やわが国企業の製品が世界市場で大いに存在感を発揮するに至っている。スターリングエンジンは残念ながら実用化には至らなかったが，再生機も含めた熱交換器の設計技術，サイクル解析技術等が向上した。逆サイクルを使えば，マイナス百度以下の発生手段としての可能性がある事が分かり，高精度赤外線センサー（化合物半導体）の冷却器を自主的に試作した。これによって高空からの地表面高感度観測手段として有効なことを示す事が出来た。この経験を通じて筆者は，先導的課題にチャレンジする事は，たとえ最初に目指したアウトカムに到達しなくても，挑戦の過程で多くの基礎・基盤技術の蓄積を可能にし，それが又新たな展開の起爆剤になるものであると認識した。

近年，オープンイノベーションの重要性が盛んに指摘されているが，筆者は既に NEDO プロジェクトへの参加のお陰で，その意義，メリットを強く実感できた。一部門，一企業では十分な対応が出来ない事項でも，国研や大学，企業内他部門，異業種の他企業と連携することによって対応力が飛躍的に増すことは明白であった。活動の成果は，いわゆる広義の知的財産として蓄積されるため，企業内でのそれらの敷衍・進化が容易になり，イノベーションの呼び水となる。ここで言う広義の知的財産とは，単に産業財産権のみを指すのではなく，有益な技術情報・知識・データ等も含めたものである。

筆者は 2002 年 4 月，当時苦境にあった三菱電機の社長に就任したが，それまでの経験を活かし，本来のオープンイノベーションに加え社内の各部門がクロスファンクショナル的に連携する社内のオープンイノベーションを意識した経営を推奨した。蓄積されている広義の知的財産を生かして比較優位にある良い事業を更に強化し，グローバル市場での競争力を高めることに努めた。2003 年度最終損益が黒字化して以後黒字体質を維持し今日に至っている。知的財産はお金と違って使えば減る財産ではなく，使えば使うほど新たな価値を増やすことのできる性格のものである。資源に乏しく雇用者報酬も比較的高いわが国の企業がグローバル競争に打ち勝っていくためには広義の知的財産重視の経営が不可欠である。この事を忘れて，財務戦略や M&A 戦略だけに流されてはわが国企業として十分な競争力を得ることは不可能であろう。

序ながら少し付言する。筆者は，2009 年 4 月産総研理事長に就任した。就任を打診された当初は，浅学非才の自分には身に余る重責だと辞退したが，幾度も勧誘を受けて遂には就任を引き受けることになった。

なに故だろう？！！ 心のどこかに、産総研は、時々時代の要請を受けて国として推進すべき研究の実施主体である。そしてその生み出す論文や特許、国際標準や JIS 規格、そして数多くの技術相談や人材育成への対応などの実績からして、国レベルで広義の知的財産重視経営を推進する上での最も重要な役割を担っている集団であり、その力になりたい、なるべきと言う思いがあったが故であろう。就任後、この役割を果たそうとする多くの研究者の旺盛にして清々しい”志“に出会った。筆者は彼らと“志”を共有して理事長としての4年間を過ごす事ができた。

【参考文献】

- (1) 山下巖：汎用スターリングエンジン－中間評価を終えて－，エネルギー・資源，8-2，（1987），40-46.
- (2) ムーンライト計画資料（汎用スターリングエンジン計画評価ワーキンググループ調査報告書，1988年3月）.
- (3) 山下巖：ムーンライト計画におけるスターリングエンジンの研究開発，日本エネルギー学会誌，72-796，（1993），742-751.
- (4) 山下巖ほか：スターリングエンジンの設計（2009），パワー社

山下 巖・略歴

1965年3月	大阪大学大学院理学研究科修士課程修了
1965年4月	通商産業省工業技術院機械試験所入所
1975年6月	理学博士（大阪大学）
1977年10月	同所（機械技術研究所と名称変更）基礎部エネルギー課長
1987年6月	同所エネルギー部長
1993年4月	東京電機大学工学部一部機械工学科教授
2006年3月	同大学定年退職
2006年4月	同大学名誉教授
2019年7月16日	死去（享年78歳）

野間口有・略歴

1965年3月	京都大学大学院理学研究科修士課程修了
1965年4月	三菱電機株式会社入社
1975年3月	工学博士（大阪大学）
1995年6月	同社取締役 情報技術総合研究所長
1997年6月	同社常務取締役 開発本部長
2001年4月	同社代表取締役 専務取締役
2002年4月	同社代表取締役 取締役社長
2006年4月	同社取締役会長
2009年4月	独立行政法人産業技術総合研究所理事長
2016年11月	旭日大綬章を受章
現 在	三菱電機特別顧問国立研究開発法人産業技術総合研究所最高顧問

受理日：2019年10月21日